

Doi:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2026.01.002

欢迎按以下格式引用:白彬,宋雅藩.产业智能化如何影响城市绿色经济效率——基于中国城市维度的经验证据[J].重庆大学学报(社会科学版),2026(1):115-129. Doi:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2026.01.002.



Citation Format: Bai Bin, Song Yafan. How does industrial intelligence improve the efficiency of urban green economy: Empirical evidence based on the dimension of China city [J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2026(1): 115-129. Doi: 10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2026.01.002.

产业智能化如何影响 城市绿色经济效率 ——基于中国城市维度的经验证据

白彬,宋雅藩

(山西财经大学公共管理学院,山西太原 030006)

摘要:党的二十届四中全会提出,加快经济社会发展全面绿色转型,建设美丽中国。在现代化产业体系取得重要进展、绿色发展成为时代浪潮的背景下,基于智能化、数字化技术的产业智能化能够推动产业引入清洁能源,形成绿色生产生活方式,其与绿色经济的深度融合及良性互动,有助于构建高质量发展新格局。那么,传统产业与智能化技术的耦合如何促进绿色经济效率提升,又是通过何种方式实现?基于中国2013—2021年221个城市的相关数据,理论分析产业智能化影响城市绿色经济效率提升的具体影响与内在机制。从产业智能化与绿色经济效率的内涵要义出发,建构指标体系,验证产业智能化赋能绿色经济效率提升的影响效应,理清产业智能化对绿色经济效率提升的作用路径,进一步阐明了产业智能化赋能的非线性影响、区域异质性效果与空间扩散特征。研究结果发现:产业智能化有利于提升城市绿色经济效率,结果具有稳健性。机制检验表明:产业智能化有效地促进了城市技术创新能力和环境规制水平的提升,助推城市绿色经济发展。异质性分析表明:产业智能化的驱动作用在中西部地区具有显著影响,在东部地区与东北地区促进作用不显著;门槛效应检验表明:产业智能化对城市绿色经济效率具有非线性影响;空间效应检验表明:产业智能化在经济地理权重矩阵下可以进一步提升经济发展状况接近地区的绿色经济效率水平。基于此提出如下政策启示:从基础设施建设、提供资金人才支持以及推动成果转化等方面释放产业智能化发展潜力;发挥技术创新与环境规制的间接驱动作用,注重产业智能化发展过程中的产业结构调整,进一步释放产业结构升级的赋能效应;不同地区应立足本地发展实际与国家功能定位,发挥政府宏观调控作用,实现区域协同发展。

关键词:产业智能化;绿色经济效率;技术创新能力;环境规制水平;空间杜宾模型

中图分类号:F205;F124.5;F49 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-5831(2026)01-0115-15

基金项目:山西省高质量发展研究项目“数智赋能基层治理能力现代化提升研究”(SXGZL202478)

作者简介:白彬,山西财经大学公共管理学院副教授,硕士研究生导师,Email: binbin_666@tju.edu.cn。

引言

党的二十届四中全会提出,加快经济社会发展全面绿色转型,建设美丽中国。《中共中央、国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》强调,推动经济社会发展绿色化是实现高质量发展的关键环节。然而,自然资源禀赋^[1]、地区间发展不充分不平衡^[2]等现实困境使发展与环境的兼顾任重道远。近年来,中国现代化产业体系建设取得重要进展,创新驱动发展能力持续提升,产业智能化水平不断提高。作为人工智能驱动下的智能经济模式,产业智能化能有效减少能源消耗量,提高能源使用效率^[3],在推动城市绿色经济发展过程中作用显著。基于此,系统评估产业智能化对城市绿色经济效率的作用机理具有重要现实价值:一方面需验证产业智能化能否成为提升绿色经济效率的有效路径,另一方面需多维解构其作用机制与传导路径。上述研究不仅能够揭示产业智能化与城市绿色发展的内在耦合机制,而且可以为构建智能化驱动的绿色生产体系提供政策靶点,为实现经济高质量发展与生态环境保护协同推进提供理论支撑与实践指引。

一、文献综述

(一)关于绿色经济效率的研究

目前,关于绿色经济效率的研究集中在测度方式与影响因素。学界共识为采用数据包络分析法构建指标体系测算指数作为其代理变量^[4-5];影响因素主要从结构、制度与技术进行探究^[6]。结构主要包括产业结构调整与产业集聚,产业结构升级能够显著提升城市的节能减排效应^[7],其可分为产业结构高级化和产业结构合理化,产业结构高级化能够发挥驱动作用,但产业结构合理化的赋能效应有待进一步挖掘^[8];产业集聚则可以显著促进本区域绿色经济效率提升^[9]。制度因素主要包含绿色财政政策^[10]、环境规制^[11]、地方政府环境治理目标强度^[12]等。此外,技术创新^[13]可能抑制绿色经济效率的提升,但在数字产业赋能绿色经济发展过程中,颠覆式技术创新是重要的机制路径^[14]。

(二)关于产业智能化的研究

产业智能化是整合人工智能、物联网等新一代信息技术,实现基础人力劳动的智能化替代,进而驱动全产业链智能升级,创造跨产业协同增值效应的新型发展模式^[15]。产业智能化测度方式有两种观点:一是采用单一指标,如全球计算机制造与信息服务业投入到中国各行业的中间品占增加值或总投入比重^[16-17]、直接消耗系数^[18]、机器人使用密度^[19]等作为代理指标;二是构建指标体系对产业智能化进行测度。例如:早期从基础设施、信息化平台与智能化创新等相关维度^[20-21],或从基础设施情况、生产活动情况、创新与企业效益等方面^[22],运用主成分分析法测算指数;近期则是围绕智能化条件、创新与应用三个维度展开^[23-24]。

(三)关于产业智能化与绿色发展关系的研究

已有研究通过理论分析^[25]与实证检验发现,产业智能化可以促进低碳经济发展,学界也验证了资本配置效率、能源利用效率^[2]、绿色技术创新^[26]、产业结构升级^[23]等因素的强化效应与产业结构合理化的弱化效应^[24],产业智能化带来的生产要素转移以及地方政府锦标赛效应会导致产业结构合理化水平下降^[27]。同时,研发创新的机会成本和逆向溢出效应^[13]可能使技术创新的助推作用难以完全释放。进一步分析表明,在地区不同产业结构高级化、合理化、技术创新水平^[24]、经济发展水平下^[2],产业智能化对低碳经济发展的促进作用呈非线性特征。

综上所述,已有研究为本文提供坚实理论与经验支撑,但鲜有研究从绿色经济效率视角系统分析产业智能化的赋能机理。为扩展研究视野、丰富研究成果,本文首先对产业智能化赋能绿色经济效率提升进行理论分析与实证检验;其次从产业结构升级、技术创新能力、环境规制三方面剖析其作用机制;最后借助门槛效应与空间效应模型,揭示产业智能化赋能的门槛特征与空间溢出特征,以期为推动城市绿色发展提供有益借鉴。

本文主要的贡献在于:一是在研究视角上,从产业智能化视角出发研究其赋能效应,丰富现有研究体系;二是在研究维度上,基于城市维度剖析产业智能化赋能的内在机制及现实效应,拓展既有研究主要集中在宏观省际层面的不足;三是在研究内容上,考察了产业智能化影响绿色经济效率的门槛特征和空间溢出特征,以丰富研究体系,所得结论蕴含着更具针对性的政策启示。

二、理论分析与研究假设

(一)产业智能化对绿色经济效率的影响

产业智能化依托智能技术提升资源配置效率和全要素生产率^[28],进而推动城市绿色经济效率提升。其直接影响主要体现为两方面。首先,从能源管理端看,产业智能化助推城市建构精准能源管理体系、优化能源组合效率;同时,大数据赋能实时采集能源消费数据,借助智能调控优化供给,精准对接消费需求,减少能源错配损耗,实现绿色经济效率结构性提升。其次,就污染治理端而言,产业智能化通过建构一体化监测网络,实现污染排放追踪溯源,推动治理模式转向源头管控,基于整合的污染数据,智能决策系统针对性提出污染治理策略,降低环境规制成本并提高污染治理效率。此外,产业智能化还可以借助虚拟数据模型等数智化工具,实现对污染物产生和排放的模拟,从而优化城市环境治理的空间配置。总体而言,产业智能化通过提升能源清洁生产水平、供需匹配精度,增强污染排放的监测效能与治理靶向性,显著降低单位GDP排放强度,从而正向促进绿色经济效率提升。

为此,本文提出如下假设。

H1:产业智能化对绿色经济效率具有显著促进作用。

(二)产业智能化对绿色经济效率的影响机制

1. 产业结构升级的机制效应

生产要素为获取更高收益会在部门间流动^[29],智能化作为通用技术,能够影响生产要素在产业部门间流动^[30]。产业结构升级包含高级化与合理化。合理化强调资源的合理配置,然而,从城市人力资源角度看,智能化、自动化替代了部分低技能劳动力^[31],其被取代后涌入就业市场,智能化程度较高的企业对原材料的需求增加,产业链条上智能化程度较低的供应链企业则雇佣大量价格低廉的低技能劳动力,对就业结构产生重要冲击^[32];从资金角度看,企业研发投入与长周期、高不确定性收益存在结构性矛盾。在城市间维度,中心城市凭借基础设施及成本优势等吸引周边地区的人力资本,加剧了要素虹吸效应。因此,产业智能化造成的城市内部与城市间要素的不合理配置不利于产业结构合理化的发展。高级化强调提升产业结构的科技含量和技术水平,但受限于企业相对偏好使用能够带来更多收入的资本^[33],资源难以实现合理配置,城市创新呈现的“硬件升级快、软件突破慢”特征也进一步使得产业高级化进程及作用发挥受到阻碍。综上所述,尽管产业智能化能够提升产业生产效率,改善生态环境^[34],但产业结构升级不能发挥中介作用。值得注意的是,产业结构升级水平较低时,产业智能化的资源错配效应占据主导地位;当产业结构升级水平突破阈值,产业

智能化可以实现要素优化配置,释放绿色经济潜力。

2. 技术创新水平的机制效应

产业智能化对城市绿色经济效率的驱动机制可通过技术创新传导路径实现。产业智能化以智能设备替代重复性人力劳动,精准匹配数据要素,降低创新试错成本,优化资源配置效率,形成边际收益递增效应,促使城市持续追加创新投入以维持竞争优势,进而催生产业技术体系突破性重构^[35]。这种创新动能通过产品服务绿色化迭代与生产工艺清洁化转型双重路径,推动经济系统向全要素生产率提升与生态环境损耗脱钩的发展范式演进,实现经济增长质量与生态效益的协同优化^[36-37]。

3. 环境规制水平的机制效应

环境规制是通过立法约束、经济激励及行政干预等手段构建的污染行为约束机制。“波特假说”指出适度环境规制能够触发创新补偿效应即污染成本内部化压力下,产业通过绿色技术研发突破环境约束,实现生产效率提升与污染排放降低的“双重红利”^[1]。这种“规制—创新—增效”的动态激励路径,在智能化时代,因产业智能化的深度渗透呈现出更复杂的交互机制。产业智能化对环境规制的赋能效应,集中体现在技术工具革新与治理模式重构两大维度。一方面,智能传感网络、区块链溯源系统与数字孪生技术的应用,推动环境监管转向全生命周期管控。监管部门实时获取能耗排放数据并精准溯源,显著提升违规行为识别率,以生产可视化倒逼产业清洁化改造。另一方面,产业智能化基于数据驱动构建政企协同治理新范式,确保政府环境规制的积极作用充分发挥,促进城市绿色经济效率显著提升。

为此,本文提出如下假设。

H2a:在目前产业智能化水平条件下,难以激发产业结构升级的中介作用。

H2b:技术创新能力在产业智能化赋能过程中发挥机制作用。

H2c:环境规制水平能够在产业智能化促进城市绿色经济效率提升过程中发挥中介作用。

三、研究设计

(一)模型构建

1. 基准回归模型

为检验产业智能化对绿色经济效率的影响,本文构建如下模型。

$$Gee_{it} = \beta_0 + \beta_1 Intel_{it} + \sum_k \beta_k Control_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, i 、 t 表示地级市与时间, Gee 、 $Intel$ 表示绿色经济效率与产业智能化水平, μ_i 、 v_t 分别表示表示个体、时间固定效应, ε_{it} 表示随机扰动项。

2. 中介效应模型

为进一步考核产业智能化是否通过本文选取的中介变量来影响绿色经济效率,本文参考中介效应检验程序^[38-39],鉴于学界已经对产业结构升级、技术创新能力以及环境规制对提升绿色经济效率的作用进行了理论与实践证明^[24],本文在实证上仅检验了产业智能化对中介变量的影响。在式(1)的基础上构建如下模型。

$$M_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Intel_{it} + \sum_k \gamma_k Control_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, M 为本文的中介变量,其他变量设定与式(1)保持一致。

(二)变量测量及数据来源

1. 解释变量

借鉴已有研究,从智能化条件、智能化应用和智能化技术三个方面,采用熵权法测算城市产业智能化指数^[23],表征城市产业智能化水平。

第一,智能化条件。从通信技术基础设施、信息基础设施和信息化水平三个方面构建指标体系。通信技术基础设施以城市光缆密度衡量,利用城市市政公用设施建设固定资产投资总额占省级比重计算;信息基础设施以城市移动交换机容量衡量,利用城市电信业务总量占省级比重计算;信息化水平以城市年末互联网宽带接入用户数与年末户籍人口之比衡量。

第二,智能化应用。计算城市层面机器人密度用以表征城市的智能化应用水平^[40]。基于Bartik工具变量思想,借鉴既有文献的通行做法,计算各个城市在各个年份的工业机器人密度。具体的计算方式如下:

$$AIB_{it} = \sum_{j=1}^J \frac{\text{employ}_{i,j,t=2013}}{\text{employ}_{i,t=2013}} \times \frac{\text{Robot}_{jt}}{\text{employ}_{j,t=2013}} \quad (3)$$

其中: AIB_{it} 为城市*i*在*t*年的工业机器人密度, J 表示各行业的合集, $\text{employ}_{i,j,t=2013}$ 为城市*i*中行业*j*在2013年的就业人数, $\text{employ}_{i,t=2013}$ 是城市*i*在2013年的就业人数, Robot_{jt} 为由《全球工业机器人报告》所提供的行业*j*在*t*年的工业机器人存量, $\text{employ}_{j,t=2013}$ 是行业*j*在2013年的就业人数。

第三,智能化技术。采用人工智能企业数量进行衡量。利用Python爬虫技术对企查查“经营范围”“公司名称”范围栏,以“智能”“云”“数据”等与智能化相关的内容进行查询,获取城市人工智能企业数量的对数值衡量城市智能化技术水平。

2. 被解释变量

本文利用非径向SBM-DEA计算城市的绿色经济效率^[41]。采用2013—2021年从业人员数量表示劳动力投入。使用永续盘存法估算各城市的资本存量表示资本投入^[42]。资本存量的测算公式为 $K_{i,t} = I_{i,t}/P_{i,t} + (1 - \delta)K_{i,t-1}$,基期资本存量为 $K_{i,2013} = I_{i,2013}/(g_i + \delta)$ 。其中: $K_{i,t}$ 、 $I_{i,t}$ 和 $P_{i,t}$ 分别为*i*城市*t*期的资本存量、全社会固定资产投资和固定资产投资价格指数; δ 为折旧率,本文取9.6%^[24]; g_i 为样本期间*i*城市全社会固定资产投资年均增长率。采用城市2013—2021年的全社会用电量表示能源投入。根据各省份生产总值平减指数将生产总值调整为以2013年为基期的不变价格并采用各城市实际国内生产总值表示期望产出。采用各城市的工业三废表示非期望产出。

3. 中介变量

第一,产业结构升级。采用“第一产业增加值占GDP的比重×1+第二产业增加值占GDP的比重×2+第三产业增加值占GDP的比重×3”来表示产业结构整体升级^[43]。第二,技术创新能力。选取发明专利授权数量来衡量城市技术创新能力^[44]。第三,环境规制。采用一般工业固体废物综合利用率来衡量环境规制效果^[45]。

4. 控制变量

采取经济发展水平、对外开放水平、基础设施水平、科技水平作为控制变量^[23-24]。其中:经济发展水平采用人均地区生产总值表示;对外开放水平采用各城市实际利用外资额与GDP的比值表示;基础设施水平采用城市人均道路面积表示;科技水平,采用各城市科学技术支出占政府财政一般支

出的比值表示。

基于数据可得性原则,本文以中国221个城市在2013—2021年的面板数据为研究对象,个别缺失值通过插值法进行补齐。本文数据均来自《中国城市统计年鉴》、各地级市统计年鉴,省级层面数据来自国家统计局,工业机器人数据来自《全球工业机器人报告》。具体变量说明如表1所示。

表1 变量的基本描述

类别	变量名称	变量符号	数据指标含义及计算
解释变量	产业智能化	Intel	构建产业智能化指数,采用熵权法进行测度
被解释变量	绿色经济效率	Gee	SBM-DEA测算的绿色经济效率
中介变量	产业结构升级	sj	产业结构指数
	技术创新能力	inno	发明专利授权数量取对数
	环境规制	envir	一般工业固体废物综合利用率
控制变量	经济发展水平	gdp	地区人均生产总值取对数
	科技水平	tech	科学技术支出占政府财政一般支出的比值
	对外开放水平	open	各地级市实际利用外资额与地区生产总值的比值
	基础设施水平	jcss	城市人均道路面积取对数

四、实证研究

(一)基准回归结果

在进行回归分析之前,本文首先对变量进行了相关性检验,其次选择方差膨胀因子(VIF)检验变量之间是否存在多重共线性问题,结果显示各变量的VIF水平均在2以下,说明本文各变量之间的多重共线性问题在可以控制的范围之内。为考察产业智能化对绿色经济效率的影响效应,对式(1)进行回归,结果如表2所示。

表2 产业智能化对绿色经济效率的回归结果

变量	Gee	Gee	Gee	Gee	Gee
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Intel	1.242** (2.34)	1.697*** (3.26)	1.501*** (2.91)	1.378*** (2.71)	1.336*** (2.60)
gdp		0.260*** (5.90)	0.257*** (5.85)	0.273*** (6.28)	0.275*** (6.36)
tech			12.342*** (3.06)	13.727*** (3.40)	13.631*** (3.40)
open				-10.672** (-2.34)	-10.635** (-2.34)
jcss					-0.020 (-0.61)
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y	Y
N	1 989	1 989	1 989	1 989	1 989
R ²	0.069	0.123	0.132	0.137	0.138

注:1. * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$; 2. 括号内的数字为 t 值,下同

为减少极端值产生的不利影响,本文对所有连续变量进行了上下1%的缩尾处理,所有模型均控制时间与个体固定效应,使用聚类稳健标准误并将其聚类到个体层面。

由表2可知,列(1)在不固定任何控制变量情况下,产业智能化对绿色经济效率回归系数为1.242,在5%水平上显著;列(5)同时加入控制变量后,产业智能化对绿色经济效率回归系数为1.336,在1%水平上显著;这表明产业智能化能够显著促进城市绿色经济效率提升。控制变量中,gdp回归系数为0.275,保持在1%水平上显著。经济发展水平在增加群众收入的同时促进了生活质量提升,增强全社会绿色发展意识,从而提升城市绿色发展水平^[46]。tech回归系数为13.631,在1%水平上显著。科技水平提升为提高资源利用效率、推动能源结构不断优化、低碳技术成果转化提供了基础,使经济高质量低碳转型发展成为可能^[47]。open回归系数为-10.635,在5%水平上显著,对外开放可能产生“污染天堂”效应,且这种效应存在隐蔽性影响^[48]。对比列(1)与列(5),在加入一系列控制变量后,产业智能化对绿色经济效率的回归系数由1.242上升至1.336,且仍然保持显著。产业智能化促进作用有了显著增强,这表明在消除部分遗漏变量偏误的情况下,产业智能化依旧可以显著促进绿色经济效率的提升,本文的H1初步成立。

(二)中介效应检验

对公式(2)进行回归检验,以检验中介变量的机制作用是否成立。结果如表3所示。

表3 中介效应检验

变量	Sj (产业结构升级)	Inno (技术创新水平)	Envir (环境规制水平)
	(1)	(2)	(3)
Intel	-0.083 (-1.17)	2.414* (1.73)	1.237*** (3.14)
时间固定效应	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y
N	1 989	1 989	1 989
R ²	0.687	0.147	0.109

由表3可知,产业智能化对产业结构升级、技术创新能力、环境规制的回归系数分别为-0.083、2.414、1.237,技术创新能力与环境规制分别在10%与1%的水平上显著。对比列(2)与列(3),产业智能化显著促进城市技术创新能力提升并提高城市环境规制水平,这可能是因为产业智能化可以通过扩大研发投入规模和技术市场交易规模来推动产品生产技术创新,实现绿色低碳生产^[49];在产业智能化发展过程中,通过提升生产要素使用效率,促进环境规制水平提高,推动城市绿色发展。根据列(1)结果可知,产业智能化会对产业结构升级产生负向影响,这可能是因为目前中国产业智能化水平较低且发展不平衡,其造成资本和人力要素流向智能化水平本就较高的城市与产业,难以实现要素资源在区域和产业间的优化配置。

综上,技术创新能力与环境规制水平可以在产业智能化与绿色经济效率之间发挥中介作用,但产业智能化目前水平较低,难以发挥对产业结构升级的促进作用,本文的H2a、H2b、H2c成立。

(三)稳健性检验

为增加上述模型的准确性与可靠性,本文采用加入更多控制变量、调整样本容量这两种方式对上述模型进行稳健性检验,结果如表4所示。

表4 稳健性检验

变量	Gee	Gee	Gee	L.Gee
	(1)	(2)	(3)	(4)
L.Intel/Intel	1.098** (2.04)	1.098* (1.82)	1.369*** (2.66)	1.265** (2.43)
gdp	0.204*** (3.35)	0.219*** (4.90)	0.360*** (7.51)	0.248*** (5.16)
open	-10.531** (-2.35)	-6.311* (-1.66)	-7.707 (-1.65)	-3.054 (-0.63)
tech	13.435*** (3.32)	10.703** (2.41)	12.970*** (3.26)	12.147*** (2.71)
jcss	-0.021 (-0.66)	-0.032 (-0.97)	-0.022 (-0.64)	-0.035 (-1.00)
fin	-0.130* (-1.91)			
时间固定效应	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y
N	1 989	1 547	1 768	1 768
R ²	0.144	0.132	0.152	0.120

列(1)加入控制变量金融发展水平,采用金融机构年末存贷款余额总和与GDP比值进行表征。由表4可知,金融发展水平对城市绿色经济效率的回归系数为-0.130,在10%水平上显著,在加入控制变量后,产业智能化对绿色经济效率的回归系数由1.336下降至1.098,但仍在5%水平上显著。列(2)选用2013—2019年城市面板数据进行回归。中国在2020年宣布要实现“双碳”目标,这标志中国绿色经济效率提升进入到新发展阶段,因此本文如此调整样本容量。由表4可知,产业智能化对绿色经济效率的回归系数为1.098,在10%水平上显著,在对样本容量进行调整后,产业智能化对绿色经济效率的回归系数有所下降但仍然在10%水平上显著。

(四)内生性处理

1. 采取滞后项进行回归

列(3)与列(4)选择滞后一期解释变量与被解释变量进行回归,滞后变量在一定程度上可缓解可能存在的内生性问题。由表4可知,滞后一期产业智能化对绿色经济效率的回归系数为1.369,在1%水平上显著;产业智能化对滞后一期绿色经济效率的回归系数为1.265,在5%水平上显著,其依旧可以促进城市绿色经济效率提升,说明产业智能化对绿色经济效率的影响可能有滞后性。

2. 工具变量法

本文构建计算机器人安装密度(azmd)作为工具变量^[23],采取工具变量法缓解内生性问题,结果如表5所示。

表5 工具变量回归结果

变量	First (1)Intel	Second (2)Gee
azmd	0.004*** (17.33)	
Intel_azmd		2.011* (1.77)
控制变量	Y	Y
时间固定效应	Y	Y
个体固定效应	Y	Y
不可识别检验 (K-P LM 统计量)	54.28*** [0.000]	
弱识别检验 (K-P F 统计量)	300.41 [16.38]	
N	1 989	1 989
R ²	0.955	0.732

注:1. K-P表示Kleibergen-Paap检验,中括号内为P值;2. 大括号内为10%显著性水平上Stock-Yogo弱工具变量识别F检验的临界值;3. 小括号内的值为t值;4. azmd为机器人安装密度;5. Intel_azmd为产业智能化与工具变量的拟合值

采用工具变量两阶段最小二乘法(IV-2SLS)进行回归,工具变量通过“弱工具变量”检验和“不可识别”检验,本文选取工具变量具有合理性。由表5列(1)可知,一阶段工具变量与城市产业智能化水平在1%水平上显著正相关。列(2)中产业智能化与工具变量的拟合值对城市绿色经济效率的影响系数在10%水平上显著正相关。表5回归结果与表2基准回归结果一致,验证了基准回归结果稳健性。

综上,本文模型回归结果在经历稳健性检验与内生性检验后,产业智能化对绿色经济效率的提升具有显著促进作用这一结论依旧成立。

(五)异质性分析

区域资源禀赋、经济发展水平及环境政策力度的异质性,使产业智能化对绿色经济效率的提升效应呈现显著差异性。本文根据地理区位与环境规制水平高低对城市进行分类^[2],按照国家统计局划分标准,划分城市为四大区域,图1为不同区域绿色经济效率与环境规制强度的均值情况。

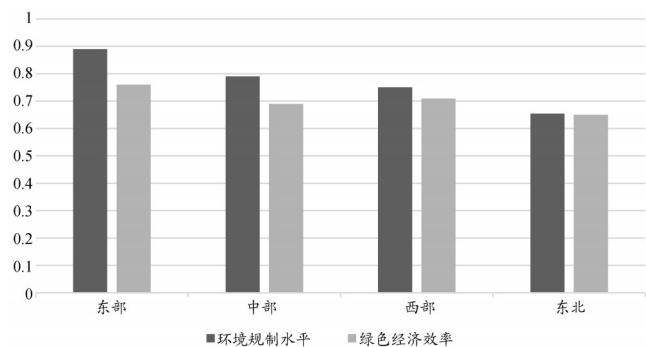


图1 分区域环境规制与绿色经济效率情况

根据图1可知,东部地区绿色经济效率与环境规制水平较高,高于全国平均值,而东北地区受制于老工业基地的自然资源禀赋,绿色经济效率与环境规制水平较低且低于全国平均水平。

1. 地理区位异质性

本文根据国家统计局标准划分城市并进行实证检验,结果如表6所示。

表6 基于地理区位的异质性分析结果

变量	Gee (东部)	Gee (中部)	Gee (西部)	Gee (东北)
Intel	0.829 (1.54)	3.230** (2.17)	4.153*** (3.34)	-0.684 (-0.31)
控制变量	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y
<i>N</i>	747	549	504	189
<i>R</i> ²	0.155	0.184	0.185	0.217

产业智能化对西部地区绿色经济效率影响最为显著,其次是中部地区,对东部及东北地区绿色经济效率发展影响不显著。究其原因,东部地区凭借早期政策功能及区位优势,科技创新资源迅速整合,创新成果转化率大幅提升,其绿色经济效率本身处于良好发展阶段,产业智能化赋能作用进入乏力期;东北地区作为资源禀赋型老工业基地,面临资源枯竭、转型困难、智能化产业发展不足等问题,阻碍了城市产业智能化的发展及赋能优势的发挥。而中西部地区近年来在国家发展战略的支持下,积极承接产业转移并打造地区优势产业,高效提升资源利用效率,促进本地区绿色经济效率提升。

2. 环境规制异质性

本文以环境规制均值作为依据划分城市^[2],结果如表7所示。

产业智能化对绿色经济效率的影响在环境规制较强的地区不显著,在环境规制较弱的地区显著为正。可能的原因是,环境规制较强的地区,绿色经济发展较为迅速并持续健康发展,使产业智能化的促进作用并不明显。相反,在环境规制较弱的地区,产业智能化能够凭借技术集成的自动化优势,减少环境污染,促进城市绿色经济效率提升。

表7 基于环境规制的异质性分析结果

变量	Gee	Gee
	(1)	(2)
Intel	0.881 (1.37)	2.922*** (2.81)
控制变量	Y	Y
时间固定效应	Y	Y
个体固定效应	Y	Y
<i>N</i>	1 300	689
<i>R</i> ²	0.130	0.172

五、拓展性分析

(一) 门槛效应检验与分析

基于上文分析可知,在产业智能化赋能绿色经济效率提升过程中,产业结构升级可能存在非线性影响。因而本文以其作为门槛变量进一步探讨^[24],构建门槛效应模型如式(4)所示。

$$Gee_{it} = \alpha + \beta_1 Intel_{it} \times I(T_{it} \leq \gamma_1) + \beta_2 Intel_{it} \times I(\gamma_1 < T_{it} \leq \gamma_2) + \dots + \beta_n Intel_{it} \times I(\gamma_{n-1} < T_{it} \leq \gamma_n) + \beta_{n+1} Intel_{it} \times I(T_{it} > \gamma_n) + \delta_i Control_{it} + \mu_i + v_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, T_{it} 为门槛变量, γ 为待估算门槛值, $I(\cdot)$ 为门槛示性函数,当 $I(\cdot)=1$ 时,括号内表达式为真,当 $I(\cdot)=0$ 时,表达式为假。

本文首先通过三重门槛效应模型进行回归,设定“bootstrap=300”进行反复抽样,三重门槛效应回归结果及具体门槛值如表8所示,产业结构升级的单一门槛在1%水平下保持显著,双重门槛和三重门槛的*P*值均不显著,因此本文采用单一门槛效应进行回归检验,结果如表9所示。

表8 门槛效应检验

门槛数	门槛值	<i>P</i> 值	10%	5%	1%
Single	32.098 0	0.00	21.596 0	24.995 1	32.832 1
Double	32.266 8	0.30	17.549 3	22.679 9	31.424 8
Triple	32.457 9	0.43	17.652 1	21.100 3	27.168 7

由表9可知,当产业结构升级水平小于等于5.433 4时,产业智能化对绿色经济效率的回归系数为0.159且不显著。当产业结构升级水平大于5.433 4时,产业智能化对绿色经济效率的回归系数为1.286,在5%水平上显著。进一步分析可知,当产业结构升级低于第一门槛值时,智能化设备与生产结合能力弱,难以显著促进绿色经济发展,跨过第一门槛值后,智能技术深度融合产业发展,推动绿色创新与能源的高效利用,赋能作用得以发挥。由此可知,产业智能化对绿色经济效率的影响呈现明显非线性特征。

(二) 空间溢出效应检验与分析

从传统空间距离角度讲,中国产业智能化发展水平较低,发展不平衡且不同区域之间差距较大^[50],地区之间基础设施差异使产业智能化水平较高的地区进一步吸引物质和人力资源,转化竞争

优势,而产业智能化水平较低的地区资源愈加匮乏,出现“鸿沟”现象。从经济地理角度看,产业智能化作为通用技术,具有强知识溢出效应^[23],产业智能化水平较高的地区能够发挥灯塔效应,其先进的生产设备与管理手段,不仅能够使其他地区学习借鉴,也能够发挥扩散效应,与经济发展水平接近的地区实现产业集聚,从而促进周边地区绿色经济效率的提升。

对此,本文进一步对产业智能化赋能绿色经济效率的空间溢出效应进行检验。构建空间杜宾模型如下所示。

$$\text{Gee}_{i,t} = \alpha_0 + \rho \text{WGee}_{i,t} + \varphi_1 \text{WIntel}_{i,t} + \alpha_1 \text{Intel}_{i,t} + \varphi_2 \text{WControl}_{i,t} + \alpha_2 \text{Control}_{i,t} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

其中, ρ 为空间自回归系数, W 为空间权重矩阵, φ_1 和 φ_2 分别为核心解释变量产业智能化以及控制变量的空间交互项的弹性系数,其他符号的含义与式(1)相同。表10为部分年份产业智能化及绿色经济效率的全局莫兰指数测算结果。

表10 部分年份产业智能化与绿色经济效率的全局莫兰指数测算结果(以反距离矩阵为例)

年份	变量	I	$E(I)$	$sd(I)$	z	p-value*
2013	Intel	0.044	-0.005	0.009	5.243	0.000
	Gee	0.005	-0.005	0.009	1.017	0.155
2017	Intel	0.063	-0.005	0.009	7.229	0.000
	Gee	0.042	-0.005	0.009	4.969	0.000
2021	Intel	0.060	-0.005	0.009	6.849	0.000
	Gee	0.086	-0.005	0.010	9.520	0.000

根据表10,产业智能化与绿色经济效率的莫兰指数显著为正,说明产业智能化与绿色经济效率存在着明显的空间自相关性。

本文根据检验结果选择空间杜宾模型对空间溢出性进行检验,结果如表11所示。

表11 空间杜宾模型回归结果

	反距离权重矩阵	空间地理权重矩阵	经济地理权重矩阵
Intel	1.520*** (5.04)	1.039*** (3.58)	0.537* (1.72)
Wx	-3.578* (-1.86)	-5.428 (-0.82)	2.27*** (3.42)
Direct	1.527*** (4.95)	1.080*** (3.72)	0.536* (1.67)
Indirect	-3.737* (-1.77)	-2.787 (-1.04)	2.182*** (3.59)
Total	-2.211 (-1.09)	-1.707 (-0.62)	2.719*** (4.58)
控制变量	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y

表9 门槛模型估计结果

变量	Gee
$sj \leq 5.4334$	0.159 (0.29)
$sj > 5.4334$	1.286** (2.50)
gdp	0.285*** (6.67)
open	-10.830** (-2.43)
tech	12.168*** (2.98)
jcass	-0.016 (-0.51)
时间固定效应	Y
个体固定效应	Y
N	300

从表 11 可以看出,在经济地理权重矩阵下,解释变量空间滞后项系数显著为正,说明产业智能化对绿色经济效率提升的作用具有空间溢出性。在其他两种权重矩阵下,正向溢出效应不显著。这可能是因为在传统地理距离下,产业智能化水平较高与较低的地区可能出现“鸿沟”现象,同时,污染产业向邻近地区转移也会出现负向溢出效应。由此可知,产业智能化正向溢出效应主要存在于经济发展水平较为相近的地区之间。

本文进一步运用偏微分法对空间溢出效应进行分解。在反距离权重矩阵下,产业智能化赋能绿色经济效率提升的直接效应在 1% 水平上显著为正,间接效应在 10% 水平上显著为负;在经济地理权重矩阵下,产业智能化赋能绿色经济效率提升的直接效应与间接效应分别在 10% 与 1% 水平上显著为正。可知,在传统地理距离下,产业智能化仅对本地区绿色经济效率有正向促进作用,对邻近地区会因加剧竞争致使资源不合理流动,从而不利于邻近地区绿色经济效率提升;而在经济地理权重矩阵下,产业智能化能够发挥溢出效应,对绿色经济效率提升具有显著的正向间接效应。

六、结论和启示

在产业智能化日益显著推动城市绿色经济发展的背景下,本文基于中国城市维度相关数据,使用熵值法测量产业智能化水平,结合地区绿色经济效率,运用固定效应模型、中介效应模型、门槛效应模型以及空间杜宾模型,多维度实证了产业智能化对绿色经济效率的内在机制和现实效应,可归纳出以下研究结论:第一,推动产业智能化转型对于促进绿色经济效率具有显著提升作用。第二,通过提升技术创新能力与环境规制水平,产业智能化可以有效促进绿色经济效率提高。第三,产业智能化对于绿色经济效率的影响具有非线性特征。第四,在经济地理权重矩阵下,产业智能化不仅对本地区绿色经济效率有正向促进作用,而且对邻近地区也具有显著影响。

基于研究结论,可得到以下研究启示。

第一,充分释放产业智能化潜力。各城市应从基础设施建设、提供资金人才支持以及推动成果转化等方面夯实产业智能化发展的根基。在基础设施方面,要在完善产业智能化所需的网络、云计算、互联网等设施的基础上,鼓励企业与科研机构合作,加大智能化设备研发投入。在资金人才方面,政府应该设立专项资金,对智能化基础设施建设项目和智能化设备研发企业给予补贴与贷款优惠,降低企业金融投资风险,同时加强本地区技术人才的培养和引进,通过举办学术交流等方式,提高企业人员的智能化技术水平。在推动智能化成果转化方面,政府应建立成果转化平台,积极运用先进技术设备进行能源管理与污染防控,加速智能化技术从理论层向应用层的转化。

第二,发挥技术创新与环境规制的间接驱动作用,进一步释放产业结构升级的赋能效应。一是稳步推进产业结构升级,地方政府既要培育新型产业与高端制造业,提升产业的高科技含量,又要通过政策引导,加强对低技能人员的再就业培训,促进产业与人员良性耦合,避免出现产业失衡与资源的浪费。二是加快技术研发,落实给予研发费用加计扣除、高新技术企业税收优惠等政策,切实通过降低企业创新成本进而推动企业提升技术创新研发。三是加强政府环境规制,完善绿色生产相关指导建议和法律法规,促进企业提升清洁型生产比重。

第三,因地制宜,兼顾局部发展与整体定位。东部地区及环境规制较强的地区应依托自身的技术研发、产业集聚优势,强化示范与灯塔效应,既要锚定高端制造业的发展目标,积极探索,形成更多可借鉴经验,又要通过溢出效应带动其他地区的产业智能化发展;中西部地区与环境规制较弱地区应立足自身资源禀赋与国家战略支持的机遇,优化营商环境,高质量承接先进企业,同时适当提

升环境规制强度,避免陷入污染转移的发展困境;东北地区应改变过度依赖能源的粗放型经济发展模式,一方面加大技术研发投入,提高传统产业的附加值与竞争力,另一方面加大对新兴产业和高端制造业的培育力度,积极探索产业结构转型的新路径^[51]。

参考文献:

- [1] 向君. 自然资源禀赋、环境规制对地区绿色经济增长效率的影响[J]. 统计与决策, 2023(8): 51-56.
- [2] 许军. 产业智能化赋能低碳经济发展:理论机制与实证检验[J]. 统计与决策, 2024(15): 76-81.
- [3] 黄海燕, 刘叶, 彭刚. 工业智能化对碳排放的影响:基于我国细分行业的实证[J]. 统计与决策, 2021(17): 80-84.
- [4] 郝国彩, 徐银良, 张晓萌, 等. 长江经济带城市绿色经济绩效的溢出效应及其分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2018(5): 75-83.
- [5] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 鲁南经济带城乡绿色发展效率时空分异及驱动因素识别[J]. 自然资源学报, 2020(8): 1972-1985.
- [6] 刘强, 马彦瑞, 徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J]. 中国人口·资源与环境, 2022(3): 72-85.
- [7] 刘照德, 聂普焱. 经济集聚、产业结构升级与绿色经济效率协调发展:基于京津冀与粤港澳大湾区的比较分析[J]. 北京社会科学, 2023(12): 29-43.
- [8] 曹梦渊, 李豫新. 数字经济与黄河流域绿色经济效率:机制分析与实证检验[J]. 统计与决策, 2024(6): 27-32.
- [9] 王京, 潘红玉, 资树荣, 等. 文化产业集聚对绿色经济效率的空间溢出效应[J]. 科学决策, 2023(8): 53-68.
- [10] 陈言, 吕丽娟. 绿色财政政策与绿色经济效率:基于节能减排综合示范城市政策的准自然实验[J]. 南开经济研究, 2024(7): 201-218.
- [11] 章志华, 孙林. 双向 FDI 协调发展、环境规制与绿色创新效率:基于两阶段创新价值链的研究视角[J]. 统计学报, 2023(4): 28-40.
- [12] 徐妍, 郑冠群, 沈悦. 地方政府环境治理目标约束强度与绿色经济效率[J]. 中国经济问题, 2022(6): 165-177.
- [13] 张杨, 睢党臣, 孟望生. 技术创新、技术引进与绿色经济增长效率[J]. 统计与决策, 2024(2): 133-138.
- [14] 米国芳, 吕森鑫, 苏坤荣. 数字经济与实体经济融合的碳减排效应:来自我国省域的经验证据[J]. 统计学报, 2024(2): 12-26.
- [15] 白珊, 张莹, 刘柏君. 产业智能化对省域创新韧性的影响:基于面板数据的实证研究[J]. 科技管理研究, 2024(17): 92-101.
- [16] 杨飞, 范从来. 产业智能化是否有利于中国益贫式发展?[J]. 经济研究, 2020(5): 150-165.
- [17] 韩亚峰, 甄莹, 张宁. 产业智能化、人口老龄化与益贫式增长[J]. 科学学研究, 2024(3): 503-514.
- [18] 杨飞. 产业智能化如何影响劳动报酬份额:基于产业内效应与产业关联效应的研究[J]. 统计研究, 2022(2): 80-95.
- [19] 张龙鹏, 张双志, 胡燕娟. 产业智能化对出口复杂度的影响:兼论人口老龄化的调节作用[J]. 产业经济评论, 2023(2): 41-54.
- [20] 张万里, 宣畅. 产业智能化对产业结构升级的空间溢出效应:劳动力结构和收入分配不平等的调节作用[J]. 经济管理, 2020(10): 77-101.
- [21] 沈悦, 赵强, 朱雅玲. 产业智能化对消费升级的作用机制研究:理论分析与实证检验[J]. 经济纵横, 2021(3): 78-88.
- [22] 孙群力, 谢滨泽. 产业智能化、劳动力结构与技能溢价[J]. 统计与决策, 2023(9): 179-184.
- [23] 赵培雅, 高煜, 孙雪. “双控”目标下产业智能化的节能降碳减排效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2023(9): 59-69.
- [24] 罗良文, 张郑秋, 周倩. 产业智能化与城市低碳经济转型[J]. 经济管理, 2023(5): 43-60.
- [25] 韩秋明, 王书华, 杨学成, 等. 产业智能化的发展机理、影响因素及对策建议:基于行业专家访谈的质性研究[J]. 中国科技论坛, 2021(8): 59-69.
- [26] 陈怀超, 白珊, 范建红, 等. 产业智能化对省域生态效率的影响:基于面板数据的实证研究[J]. 科技进步与对策, 2024(22): 70-79.

- [27] 宣畅,张万里. 产业智能化、收入分配与产业结构升级[J]. 财经科学,2021(5):103-118.
- [28] Graetz G, Michaels G. Robots at work[J]. The Review of Economics and Statistics, 2018, 100(5): 753-768.
- [29] Robinson S. A note on the U hypothesis relating income inequality and economic development[J]. The American Economic Review, 1976, 66(3): 437-440.
- [30] 郭凯明. 人工智能发展、产业结构转型升级与劳动收入份额变动[J]. 管理世界, 2019(7): 60-77.
- [31] Autor D H. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation[J]. The Journal of Economic Perspectives, 2015, 29(3): 3-30.
- [32] 王子敏. 互联网、技能偏向与农村流动人口就业[J]. 人口与经济, 2017(2): 107-115.
- [33] Berg A, Buffie E F, Zanna L. Robots, growth, and inequality[J]. Finance & Development, 2016(3): 10-13.
- [34] 吴旺延,刘璐宇. 智能制造促进中国产业转型升级的机理和路径研究[J]. 西安财经大学学报, 2020(3): 19-26.
- [35] Acemoglu D, Aghion P, Bursztyn L, et al. The environment and directed technical change[J]. American economic review, 2012, 102(1): 131-166.
- [36] 彭影,李士梅. 创新与低碳政策的绿色经济转型效应:基于数据要素流动环境视角[J]. 当代经济管理, 2023(8): 69-79.
- [37] 刘丁蓉,孙仕,林晓燕. 数字产业集聚、绿色技术创新与生态韧性[J]. 统计学报, 2025(3): 43-55.
- [38] 温忠麟,叶宝娟. 中介效应分析:方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014(5): 731-745.
- [39] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5): 100-120.
- [40] 许健,季康先,刘晓亭,等. 工业机器人应用、性别工资差距与共同富裕[J]. 数量经济技术经济研究, 2022(9): 134-156.
- [41] 张长征,孙潇怡. 绿色金融能提升绿色经济发展效率吗?[J]. 资源与产业, 2023(5): 72-85.
- [42] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10): 35-44.
- [43] 王兴国,于婷. 数字普惠金融、产业结构升级与城乡收入差距:基于中介效应和门槛效应的实证检验[J]. 东岳论丛, 2024(11): 129-138.
- [44] 潘明清,谢清华,崔冉. 资源配置视角下绿色金融对绿色技术创新的影响研究[J]. 经济问题, 2024(4): 52-59.
- [45] 宋劲松,袁梦伊,张丽娜. 新型城镇化影响区域高质量发展的空间效应:以长江中游城市群为例[J]. 经济地理, 2024(11): 43-51.
- [46] 王弘毅,谢冬水. 土地供给结构扭曲与绿色经济效率:基于中国城市面板数据的实证[J]. 统计与决策, 2023(19): 126-131.
- [47] 陈伟,李卓航,肖映彤,等. 城市群空间结构能否助力经济与碳减排的双赢发展:基于中国19个城市群的实证分析[J]. 城市观察, 2023(6): 126-140.
- [48] 方杏村,田淑英,王晓玲. 财政分权、产业集聚与绿色经济效率:基于270个地级及以上城市面板数据的实证分析[J]. 经济问题探索, 2019(11): 164-172.
- [49] 李媛. 数字经济与实体产业深度融合的战略重点与推进路径[J]. 山东社会科学, 2024(1): 90-97.
- [50] 陈庭强,史嘉豪,刘梦,等. 金融发展与产业智能化对绿色经济发展的赋能机制[J]. 科技进步与对策, 2024(17): 54-63.
- [51] 田时中,任学琴. 中国全面绿色转型水平评价:跟踪评估及系统耦合协调[J]. 统计学报, 2025(3): 1-12.

How does industrial intelligence improve the efficiency of urban green economy: Empirical evidence based on the dimension of China city

Bai Bin, Song Yafan

(School of Public Administration, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, P. R. China)

Abstract: The Fourth Plenary Session of the 20th Central Committee of the Communist Party of China

proposes accelerating the all-round green transition of economic and social development and building a Beautiful China. Against the backdrop of significant progress in building a modernized industrial system and the rising tide of green development, industrial intelligence, underpinned by smart and digital technologies, can drive the adoption of clean energy and foster green production and consumption patterns. The deep integration and virtuous interaction between industrial intelligence and the green economy will contribute to establishing a new framework for high-quality development. How, then, does the coupling of traditional industries with intelligent technologies enhance green economic efficiency, and through what mechanisms is this achieved? Based on panel data from 221 Chinese cities between 2013 and 2021, this study theoretically analyzes the specific impact and internal mechanisms through which industrial intelligence influences urban green economic efficiency. Starting from the core connotations of industrial intelligence and green economic efficiency, an indicator system is constructed to empirically test the enabling effect of industrial intelligence on green economic efficiency, clarify its transmission pathways, and further elucidate the non-linear effects, regional heterogeneity, and spatial diffusion characteristics of this empowerment. The findings reveal that industrial intelligence significantly enhances urban green economic efficiency, and this result remains robust. Mechanism tests indicate that industrial intelligence effectively boosts urban technological innovation capability and environmental regulatory stringency, thereby promoting green economic development. Heterogeneity analysis shows that the driving effect of industrial intelligence is statistically significant in central and western regions, but not significant in eastern and northeastern regions. Threshold effect tests confirm a non-linear relationship between industrial intelligence and urban green economic efficiency. Spatial effect tests demonstrate that, under an economic-geographical distance matrix, industrial intelligence can further elevate the green economic efficiency of geographically proximate regions with similar economic development levels. Based on these findings, the following policy implications are proposed: unleash the potential of industrial intelligence by strengthening infrastructure, providing financial and talent support, and facilitating the commercialization of R&D outcomes; leverage the indirect driving forces of technological innovation and environmental regulation, emphasize industrial restructuring within the process of industrial intelligence development, and further harness the empowering effect of industrial upgrading; regions should develop strategies based on their local conditions and national functional positioning, and governments should exercise effective macro-regulation to achieve coordinated regional development.

Key words: industrial intelligence; green economy efficiency; technological innovation ability; environmental regulation level; spatial Durbin model

(责任编辑 傅旭东)